

Kajian Hidraulika Pelimpah Gergaji di Bendung Gandong Kerik Kabupaten Magetan

Dika Khulashotul Lativa, Ismail Sa'ud, Rizki Robbi Rahman Alam
Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ismailsaud.its@gmail.com

Abstrak—Mercu karet di Bendung Gandong Kerik sobek. Oleh karena itu, dilakukan penggantian bendung karet menjadi bendung tetap dengan pelimpah gergaji. Perubahan tipe pelimpah menyebabkan perubahan hidraulika aliran. Maka kajian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh desain pelimpah gergaji terhadap aspek hidraulika aliran agar aman untuk hulu-hilir, memenuhi kebutuhan irigasi, dan memperkecil pembongkaran konstruksi eksisting. Pelimpah gergaji didesain dengan tinggi mercu (P) 1,2m dan tinggi muka air (H) 0,75 m. Pelimpah gergaji dibangun dengan membongkar terjunan 1 pada konstruksi eksisting, sedangkan lantai transisi dan terjunan 2 dipertahankan. Aliran yang jatuh melalui pelimpah gergaji terjun pada jarak 6,65 m dengan $Fr = 5,34$. Profil muka air yang melalui ujung gigi depan pelimpah gergaji membentuk muka air yang tinggi di ujung lantai transisi sehingga muka air lanjutannya seakan-akan menerus ke loncatan hidraulik di hilir. Sedangkan profil muka air yang melalui ujung gigi belakang membentuk muka air yang kecil sehingga profil muka air lanjutannya mengalir ke arah kolam olak mengikuti geometri bendung (terjunan 2). Profil muka air di ujung terjunan 2 membentuk $Fr = 4,96$, $V = 12,49$ m/detik, $y_2 = 4,22$ m, $y'_2 = 3,78$ m. Pola loncatan hilir adalah $y'_2 < y_2$ sehingga dipasang rip-rap untuk mengurangi erosi. Video hasil simulasi aliran dengan ANSYS-Fluent menggambarkan olakan akibat perubahan geometri pelimpah (penyempitan), terjunan melalui pelimpah, serta loncatan hidraulik di kolam olak. Kontur *water volume fraction* mengonfirmasi hasil analisis profil muka air yang melalui gigi depan dan belakang pelimpah gergaji dari perhitungan manual. Kontur *eddy viscosity* menunjukkan turbulensi tinggi terjadi di loncatan hidraulik. Perhitungan manual maupun ANSYS-Fluent menunjukkan tidak adanya luapan aliran yang melebihi tanggul eksisting.

Kata Kunci—ANSYS-Fluent, Bendung, Hidraulika, Pelimpah Gergaji, Profil Muka Air.

I. PENDAHULUAN

BENDUNG Gandong Kerik merupakan bendung karet yang terletak di Kecamatan Takeran, Kabupaten Magetan. Bendung ini mengairi DI Takeran seluas 569 ha [1]. Pada tahun 2019, bendung karet tersebut mengalami kerusakan akibat banjir sehingga karet bendung sobek. Pada tahun 2022, Dinas PU Kabupaten Magetan bersama BBWS Bengawan Solo melakukan pengeleman karet bendung. Namun perbaikan tersebut tidak maksimal. Karet bendung tidak dapat difungsikan kembali sehingga saat ini Bendung Gandong Kerik tidak memiliki mercu. Kondisi tersebut mengakibatkan penurunan muka air hingga 2,5m sehingga kebutuhan irigasi tidak terpenuhi. Selain itu, debit besar yang mengalir melalui pelimpah tanpa terbendung berpotensi menyebabkan banjir di hilir Sungai Gandong.

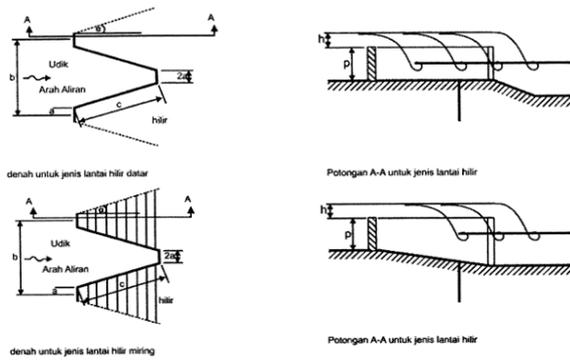
Alternatif yang dapat dilakukan untuk mengatasi masalah ini adalah mengubah tipe bendung karet menjadi bendung tetap. Konstruksi bendung tetap yang masif dapat meningkatkan kekuatan mercu sehingga lebih tahan terhadap daya rusak air. Dalam perencanaan bendung tetap ini, pelimpah

bendung didesain dengan tipe gergaji. Tipe tersebut memberikan lebar yang lebih besar dibandingkan dengan pelimpah lurus. Dalam perencanaan pelimpah tipe gergaji, penambahan tinggi mercu juga dapat dilakukan. Penambahan lebar dan tinggi mercu dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan air. Dengan kapasitas penyimpanan yang besar, maka tinggi muka air di atas pelimpah dapat diatur pada ketinggian tertentu sesuai kebutuhan dan keamanan tanggul.

Geometri pelimpah gergaji sangat berpengaruh terhadap aspek hidraulikanya. Idrees & Al-Ameri melakukan penelitian terhadap karakteristik aliran dan kehilangan energi yang terjadi pada pelimpah tipe gergaji dengan gigi trapesium melalui pemodelan fisik [2]. Dalam penelitian ini dilakukan investigasi terhadap 16 model pelimpah gergaji trapesium dengan sudut dinding sisi (α) yang berbeda-beda dari 6–35° dan 90°. Berdasarkan penelitian tersebut, α dan bilangan Froude akan meningkat seiring dengan peningkatan y_c/P . Bilangan Froude juga akan meningkat seiring dengan peningkatan α . Nilai koefisien limpasan (C_d) terbesar dihasilkan dari $\alpha = 35^\circ$. Sedangkan C_d terkecil dihasilkan dari $\alpha = 6^\circ$. Nilai C_d meningkat seiring dengan penurunan nilai H'_2/P' . Kehilangan energi yang terjadi pada aliran melalui pelimpah trapesium menurun seiring dengan pembesaran sudut dinding sisi (α). Energi sisa (E_1/E_{min}) di dasar bendung hilir mendekati nilai minimum saat y_c/P' meningkat.

Aydin & Emiroglu melakukan pemodelan numerik pelimpah gergaji berbentuk trapesium dengan dua gigi menggunakan perangkat lunak ANSYS-Fluent [3]. Pemodelan ini dilakukan untuk mengamati karakteristik aliran bebas permukaan dan limpasan. Penerapan dua gigi dalam tipe pelimpah ini didasarkan pada penelitian Khameneh dkk. bahwa peningkatan jumlah gigi menyebabkan reduksi limpasan [4]. Pemodelan dilakukan untuk pelimpah dengan bilangan Froude 0,33 dan 0,45. Simulasi menunjukkan bahwa permukaan air mulai berfluktuasi pada bilangan Froude $> 0,40$. Tinggi permukaan air naik 10 mm dari hulu menuju hilir karena penurunan kecepatan. Simulasi dengan bilangan Froude 0,45 memunculkan pusaran dan zona stagnasi di dekat dinding saluran utama. Pusaran tersebut menurunkan kinerja bendung.

Pengaruh setiap parameter pelimpah gergaji harus dianalisis dengan tepat karena merupakan pertimbangan penting dalam merancang hulu dan hilir bendung. Sebagaimana Bilangan Froude yang dihasilkan dari profil muka air di hilir akan menentukan jenis dan pola loncatan hidraulik untuk mendesain kolam olak. Perubahan tipe pelimpah di Bendung Gandong Kerik juga harus mempertimbangkan konstruksi eksisting untuk memperkecil pembongkaran. Oleh karena itu, studi ini dilakukan dengan merencanakan pelimpah gergaji beserta analisis hidraulikanya menggunakan perhitungan manual dan pemodelan dengan ANSYS-Fluent agar konstruksi pelimpah gergaji aman untuk kawasan hulu,



Gambar 1. Bentuk umum pelimpah gergaji.

hilir, memenuhi kebutuhan irigasi, dan memperkecil pembongkaran.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pelimpah Gergaji

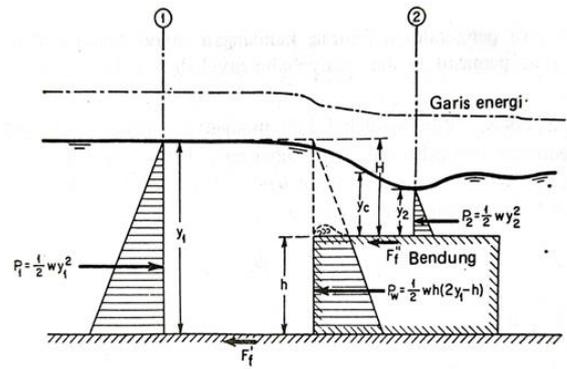
Bendung dengan pelimpah tipe gergaji berfungsi untuk melewati debit aliran sungai secara terkendali. Bangunan dibuat bergigi seperti gergaji untuk meningkatkan kapasitas pelimpahan dengan cara memperpanjang lebar efektif pelimpah. Pelimpah gergaji berbentuk trapesium memberikan efektivitas pelimpahan terbaik. Bentuk umum pelimpah gergaji ditunjukkan dalam Gambar 1.

Perencanaan pelimpah gergaji didasarkan pada Perencanaan Hidraulik Pelimpah Gergaji 2004 (Pd T-A-2004). Kriteria desain pelimpah gergaji menyaratkan nilai $h/p \leq 0,65$ dengan h/p optimum pada kisaran 0,5. Sedangkan syarat pelipatan panjang pelimpah gergaji adalah $lg/b \leq 8$ dengan lg/b optimum ≤ 4 . Pelipatan kapasitas pelimpahan ($Q_{\text{gergaji}}/Q_{\text{normal}}$) akan naik seiring dengan penambahan lg/b . Besar sudut antara dinding isi dan arah aliran pelimpah gergaji berkisar 6–25°. Untuk memperoleh nilai-nilai tersebut dilakukan pengeplotan h/p rencana ke dalam grafik pelipatan pelimpah gergaji [5].

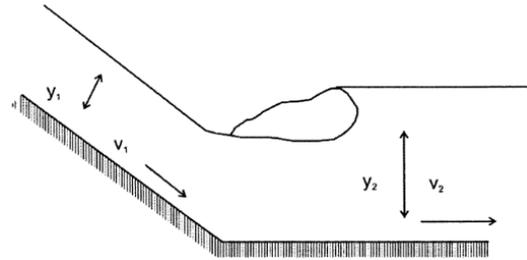
B. Momentum dalam Aliran Saluran Terbuka

Menurut Hukum Newton II mengenai gerakan, perubahan momentum per satuan waktu dalam air yang mengalir dalam saluran adalah sama dengan resultan semua gaya-gaya luar yang bekerja dalam air tersebut. Kegunaan teori momentum dapat dijelaskan pada suatu aliran superkritis yang berubah menjadi subkritis. Keadaan yang demikian sering dijumpai di bawah pelimpah dan pintu sadap yang mana tinggi tekan yang besar pada bagian hulu pintu atau pelimpah menghasilkan kecepatan yang besar tepat di bawah bangunan itu, sedangkan aliran pada bagian hilir selanjutnya akan menjadi subkritis karena kemiringan yang landai (biasanya terdapat pada sungai dan saluran). Perubahan aliran dari superkritis ke subkritis terjadi pada loncatan hidraulik (*hydraulic jump*) dimana terbentuk turbulensi dan kehilangan energi yang besar [6].

Dalil momentum dalam loncatan hidraulik untuk aliran melalui mercu lebar diilustrasikan dalam Gambar 2. Menurut Chow [7] terdapat beberapa anggapan dalam penerapan ini, yaitu: gaya gesekan F'_f dan F''_f diabaikan, y_2 adalah kedalaman minimum di atas bendung, terjadi aliran sejajar di penampang saluran, tekanan air P_w pada bendung sama dengan tekanan hidrostatis total di bawah permukaan hulu. Momentum dihitung dengan Persamaan (1).



Gambar 2. Dalil momentum untuk aliran melalui bendung mercu lebar.



Gambar 3. Loncatan hidraulik.

$$\frac{qw}{g} \left(\frac{q}{y_2} - \frac{q}{y_1} \right) = \frac{1}{2} w y_1^2 - \frac{1}{2} w y_2^2 - \frac{1}{2} w h (2y_1 - h) \quad (1)$$

C. Loncatan Hidraulik

Perubahan kedalaman aliran yang terjadi secara tiba-tiba akan mengalami peningkatan muka air mendadak yang disebut loncatan hidraulik. Ilustrasi terjadinya loncatan hidraulik ditunjukkan dalam Gambar 3.

Loncatan hidraulik dihitung dengan Persamaan (2).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (2)$$

Dimana y_2 adalah kedalaman air di hilir loncatan air, y_1 adalah kedalaman air di hulu loncatan air, dan Fr adalah bilangan Froude. Fr dihitung dengan Persamaan (3).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times d}} \quad (3)$$

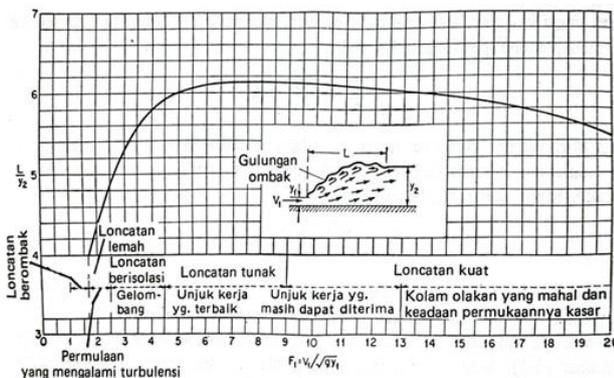
dimana v adalah kecepatan dan d adalah kedalaman aliran. Kecepatan aliran dihitung dengan Persamaan (4).

$$v = \sqrt{2gZ} \quad (4)$$

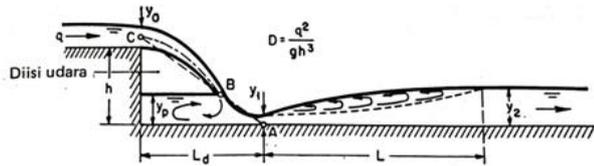
dimana g adalah percepatan gravitasi dan Z adalah tinggi jatuh. Fr menentukan kondisi aliran, di mana $Fr < 1$ merupakan aliran subkritis, $Fr = 1$ merupakan aliran kritis, dan $Fr > 1$ merupakan aliran superkritis.

Loncatan hidraulik berdasarkan Fr terbagi menjadi lima jenis, yaitu: loncatan berombak (Fr 1–1,7), loncatan lemah (Fr 1,7–2,5), loncatan berosilasi (Fr 2,5–4,5), loncatan tunak (Fr 4,5–9,0), dan loncatan kuat ($Fr > 9,0$). Pola loncatan hidraulik dibedakan menjadi tiga, yaitu: kondisi ideal ($y'_2 = y_2$), kondisi bahaya ($y'_2 < y_2$), dan kondisi aman ($y'_2 > y_2$).

Panjang loncatan (L) adalah jarak antara permukaan loncatan hidraulik sampai suatu titik pada permukaan gulungan ombak yang segera menuju ke hilir [7]. Panjang loncatan hidraulik didapatkan dari grafik dengan cara mengplot Fr sampai memotong kurva untuk mendapatkan nilai L/y_2 [8]. Grafik loncatan hidraulik tersebut ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Grafik panjang loncatan hidraulik.



Gambar 5. Geometri aliran pada pelimpah terjunan lurus.

D. Geometri Aliran pada Pelimpah Terjunan Lurus

Geometri aliran pada pelimpah terjunan lurus dapat dijelaskan dengan fungsi bilangan terjunan yang didefinisikan dengan Persamaan (5).

$$D = \frac{q^2}{gh^3} \tag{5}$$

dimana q adalah luas debit tiap satuan pelimpah, g adalah percepatan gravitasi, dan h adalah tinggi terjunan. Skema geometri aliran ditunjukkan dalam Gambar 5. Perhitungannya mengikuti Persamaan (6)–(9).

$$\frac{L_d}{h} = 4,30D^{0,27} \tag{6}$$

$$\frac{y_p}{h} = 1,00D^{0,22} \tag{7}$$

$$\frac{y_1}{h} = 0,54D^{0,425} \tag{8}$$

$$\frac{y_2}{h} = 1,66D^{0,27} \tag{9}$$

dimana L_d adalah panjang terjunan, y_p adalah kedalaman genangan di bawah air limpah, y_1 adalah kedalaman di mulainya loncatan, dan y_2 adalah kedalaman lanjutan [7].

E. Kolam Olak

Tipe kolam olak yang direncanakan di hilir bangunan tergantung pada Fr . Untuk hilir dengan $Fr \leq 1,7$ tidak memerlukan kolam olak, untuk $1,7 \leq Fr \leq 2,5$ menggunakan bangunan terjun tegak, untuk $2,5 \leq Fr \leq 4,5$ menggunakan Kolam Olak USBR Tipe IV atau kolam olak tipe blok halang, dan untuk $Fr \geq 4,5$ menggunakan Kolam Olak USBR Tipe III [9–10].

F. Pemodelan Aliran dengan ANSYS-Fluent

ANSYS adalah produk dari Perusahaan ANSYS Inc., yang digunakan untuk simulasi dan desain teknik dari secara 3D dan memecahkan berbagai masalah mekanis secara numerik. Terdapat beberapa sistem analisis dalam ANSYS, salah satunya ANSYS-Fluent. Sistem ini khusus untuk memodelkan aliran fluida, perpindahan panas dan massa,

reaksi kimia, dan masih banyak lagi. ANSYS-Fluent menawarkan *interface* modern dengan merampingkan proses CFD dalam alur kerja yang terakumulasi ke dalam satu jendela. ANSYS-Fluent dikenal dengan kemampuan pemodelan fisika tingkat lanjut yang mencakup pemodelan turbulensi serta aliran fase tunggal dan multifase.

ANSYS-Fluent menggunakan metode volume untuk menyelesaikan persamaan yang mengatur aliran fluida dan perpindahan panas. Metode ini melibatkan pembagian domain simulasi menjadi serangkaian volume atau sel kontrol kecil yang saling berhubungan. ANSYS-Fluent menggunakan algoritma iteratif untuk menyelesaikan persamaan sampai pada solusi konvergen.

III. METODOLOGI

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk mempelajari teori dasar yang digunakan dalam perencanaan pelimpah gergaji. Literatur tersebut meliputi Buku Hidraulika Saluran Terbuka (Chow, 1985) dan Aliran Melalui Saluran Terbuka (Raju, 1986), KP-02 dan KP-04 Irigasi, dan Perencanaan Hidraulik Bendung dan Pelimpah Bendung Tipe Gergaji 2004 (Pd T-01-2004-A), serta artikel ilmiah dari *Science Direct* yang dicari menggunakan kata kunci *labyrinth weir*, *flow characteristic in trapezoidal weir*, dan *ANSYS for weir simulation*. Data-data yang diperlukan untuk penelitian ini adalah DEM DAS Gandong, data curah hujan dan stasiun hujan untuk perhitungan hidrologi; data bendung eksisting dan topografi beserta *cross section*-nya untuk pertimbangan desain.

Perencanaan pelimpah gergaji meliputi penentuan tinggi muka air rencana dan tinggi mercu, penentuan pelipatan dimensi gergaji, dan perhitungan dimensi gigi gergaji. Tinggi muka air rencana harus memenuhi tuntutan elevasi *intake* irigasi dan menyisakan tinggi jagaan minimal sebesar 0,90m untuk mencegah luapan [6]. Selanjutnya dilakukan analisis hidraulika aliran yang meliputi perhitungan profil muka air untuk menentukan jenis aliran dan karakteristik loncatan hidrauliknya. Hasil identifikasi tersebut merupakan *input* perencanaan kolam olak.

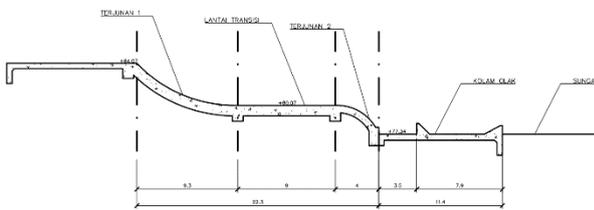
Berdasarkan KP-04 Irigasi, pemilihan tipe kolam olak didasarkan pada Fr di hilir pelimpah. Kemudian dilakukan kontrol penggerusan lokal untuk mengecek apakah desain kolam olak memerlukan rip rap. Pemodelan numerik aliran dengan ANSYS-Fluent dilakukan untuk mengetahui profil muka air yang terbentuk di sepanjang desain bendung. Profil muka air dari ANSYS-Fluent dicek luapan dan kesesuaiannya dengan perhitungan manual. Apabila hasil pemodelan menunjukkan adanya luapan air yang melebihi tanggul, maka desain rencana perlu dikaji ulang hingga tidak terjadi luapan sehingga desain pelimpah gergaji cocok untuk diterapkan karena telah memenuhi aspek hidrauliknya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Kondisi Eksisting Bendung Gandong Kerik

Bendung Gandong Kerik eksisting memiliki geometri pelimpah tanpa mercu yang terdiri atas terjunan 1, lantai transisi, dan terjunan 2 sebagaimana dalam Gambar 6.

Dengan debit hidrologi periode ulang 50 tahun (Q_{50}) sebesar 245,94 m³/detik dan lebar pelimpah 30 m, didapatkan



Gambar 6. Geometri pelimpah eksisting.

Tabel 1.

Perhitungan Profil Permukaan Air yang Melalui Pelimpah Eksisting

Z	H _z	V _z	Fr	Elev. Dasar	Elev. Muka Air	Cek V
0.00	1.90	0.00	0.00	84.07	85.97	-
0.00	1.90	0.00	0.00	84.07	85.97	-
0.00	1.89	0.43	0.10	84.07	85.96	-
1.55	1.25	6.58	1.88	82.52	83.77	0.0000
1.61	1.22	6.70	1.93	82.46	83.68	0.0000
2.22	1.06	7.75	2.41	81.85	82.91	-0.0004
2.73	0.97	8.48	2.75	81.34	82.31	-0.0001
3.14	0.91	9.00	3.01	80.93	81.84	0.0000
3.46	0.87	9.38	3.20	80.61	81.48	0.0000
3.71	0.85	9.66	3.35	80.36	81.21	0.0000
3.88	0.83	9.85	3.45	80.19	81.02	0.0000
3.98	0.82	9.96	3.51	80.09	80.91	0.0000
4.00	0.82	9.98	3.52	80.07	80.89	0.0000
4.09	0.81	10.08	3.57	79.98	80.79	0.0000
4.44	0.79	10.44	3.76	79.63	80.42	0.0007
5.16	0.74	11.14	4.15	78.91	79.65	0.0006
6.73	0.66	12.51	4.93	77.34	78.00	0.0000

tinggi muka air kritis (H_c) 1,90 m. Untuk mengetahui profil muka air yang melalui pelimpah, dilakukan perhitungan dalam Tabel 1. Dimana Z adalah kedalaman kumulatif dari puncak mercu ke titik tinjau, H_z adalah tinggi muka air dari hasil Goal Seek dari Microsoft Excel, V_z adalah kecepatan akibat terjunan yang dihitung menggunakan Persamaan (3), Fr adalah bilangan Froude yang dihitung menggunakan Persamaan (2), elevasi dasar = elev puncak mercu - Z, elevasi muka air = elevasi dasar + H, dan Cek V dihitung dengan rumus berikut.

$$Cek V = \left| \sqrt{2g \times (Y + H - Hz)} - \frac{Q}{B \times Hz} \right| = 0 \quad (10)$$

Profil muka air dari hasil perhitungan dalam Tabel 1 ditampilkan dalam Gambar 7. Parameter hidraulika di hilir aliran tersebut adalah:

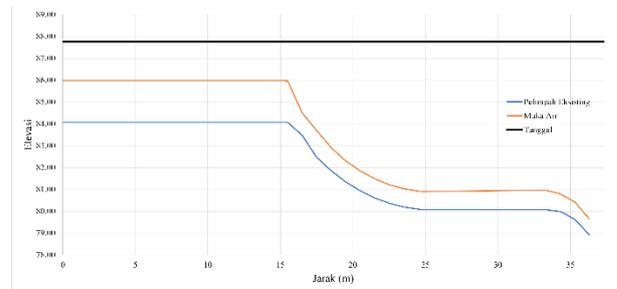
- Kedalaman jatuh $y_1 = 0,66$ m
- Kecepatan aliran $V = 12,51$ m/detik
- Bilangan Froude $Fr = 4,93$
- Kondisi aliran = Superkritis
- Kedalaman lanjutan $y_2 = 4,26$ m
- Kedalaman air bawah $y'_2 = 3,82$ m

Kedalaman air bawah lebih kecil daripada kedalaman lanjutan ($y'_2 < y_2$). Kondisi ini tergolong bahaya karena loncatan hidraulik akan menjalar ke arah hilir dan berpotensi menyebabkan erosi. Maka diperlukan rip-rap. Namun desain bendung eksisting tidak memiliki rip-rap.

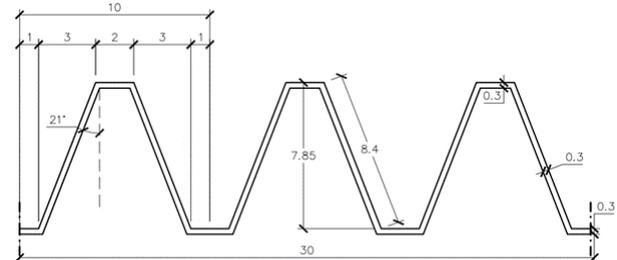
Tipe kolam olak yang sesuai untuk Fr = 4,93 adalah Kolam Olak USBR Tipe III sebagaimana telah ditampilkan dalam Gambar 7. Tipe dan dimensi kolam olak hasil analisis sama dengan dimensi kolam olak eksisting. Artinya, kolam olak eksisting telah memenuhi kriteria desain meskipun digunakan data hujan terbaru dalam analisisnya.

B. Perencanaan Dimensi Pelimpah Gergaji

Perencanaan dimensi pelimpah gergaji mempertimbangkan elevasi konstruksi eksisting untuk meminimalisasi pem-



Gambar 7. Profil muka air yang melalui pelimpah eksisting.



Gambar 8. Desain gigi gergaji.

bongkaran. Elevasi tersebut meliputi:

- Elevasi lantai udik +84,07
- Elevasi tanggul di pelimpah +87,75
- Elevasi lantai transisi +80,07
- Elevasi kolam olak +77,34
- Elevasi dasar intake +83,22
- Elevasi muka air intake +84,33

Dalam perencanaan ini, P ditentukan berdasarkan tuntutan elevasi muka air intake eksisting. Sedangkan H dicoba-coba hingga memenuhi syarat $H/P \leq 0,65$. Maka didapatkan:

$$P = 84,33 - 83,22 = 1,11 \text{ m} \approx 1,20 \text{ m}$$

$$H = 0,75 \text{ m}$$

$$\frac{H}{P} = \frac{0,75}{1,20} = 0,63 \leq 0,65$$

Untuk mengecek keamanan desain terhadap tanggul, dilakukan kontrol tinggi jagaan.

- Elevasi mercu = 84,07 + 1,20 = 85,27
- Elevasi muka air = 85,27 + 0,75 = 86,02
- Tinggi jagaan = 87,75 - 86,02 = 1,73 m > 0,90 m

Tinggi jagannya adalah 1,73 m. Maka desain diterima karena memenuhi syarat tinggi jagaan > 0,90 m. Pelipatan pelimpah gergaji (lg/b) optimum adalah 2,08 yang didapatkan dari grafik pelipatan pelimpah gergaji. Sehingga lebar pelimpah yang awalnya 30 m menjadi 62,5 m. Dimensi dan sudut gigi gergaji dihitung dengan teori *pythagoras*. Hasil perhitungan disajikan dalam Gambar 8.

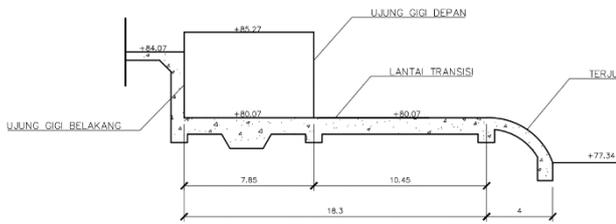
Pelimpah gergaji ini dibangun dengan membongkar terjunan 1 pada konstruksi bendung eksisting, sedangkan lantai transisi dan terjunan 2 dipertahankan. Dengan demikian desain tampak sampingnya seperti ditunjukkan dalam Gambar 9.

C. Geometri Aliran Melalui Pelimpah Gergaji

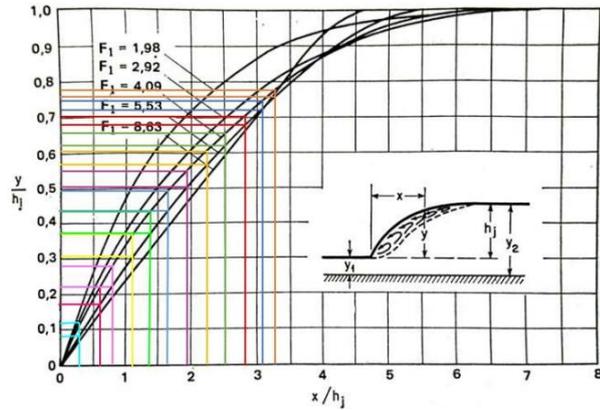
Aliran pada pelimpah gergaji menerapkan prinsip aliran pada pelimpah terjunan lurus. Perhitungannya didasarkan pada Chow [7]. Tinggi mercu ke lantai hilir (h) adalah 5,2 m (Gambar 9). Geometri aliran yang terbentuk adalah:

Muka air di atas pelimpah

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{245,94}{62,5} = 3,94 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$$



Gambar 9. Tampak samping desain pelimpah gergaji.



Gambar 10. Hasil pengeplotan untuk profil aliran yang melalui gigi belakang pelimpah gergaji.

$$D = \frac{q^2}{gh^3} = \frac{3.28^2}{9.81 \times 5.7^3} = 0.01 \text{ m}$$

- Panjang terjunan $L_d = 6,65 \text{ m}$
- Kedalaman genangan $y_p = 7,94 \text{ m}$
- Kedalaman jatuh $y_1 = 0,42 \text{ m}$
- Kedalaman lanjutan $y_2 = 2,57 \text{ m}$
- Panjang loncatan $L = 15,41 \text{ m}$
- Kecepatan aliran $V = 10,80 \text{ m/detik}$
- Bilangan Froude $Fr = 5,34$

D. Loncatan Hidraulik di Lantai Transisi

Setelah membentuk y_1 pada jarak 6,65 m, profil aliran di lantai transisi akan berbeda antara aliran yang melalui ujung gigi depan dan ujung gigi belakang pelimpah gergaji akibat perbedaan panjang lantai transisi yang ada di depannya. Panjang lantai transisi yang tersisa di depan ujung gigi belakang gergaji adalah 11,65 m (didapatkan dari 18,30 m – 6,65 m), sedangkan di depan ujung gigi depan gergaji tersisa 3,78 m (didapatkan dari 18,30 m – 7.85 m – 6,65 m).

Profil aliran yang terbentuk dihitung dengan grafik dari Bakhtmetef & Matzke [11]. Hasil pengeplotan untuk aliran yang melalui gigi belakang ditunjukkan dalam Gambar 10.

Dalam perencanaan ini, $Fr = 5,34$ yang mana ada di antara $Fr = 4,09$ dan $Fr = 5,53$. Maka dilakukan interpolasi untuk mendapatkan nilai y/h_j . Perhitungan profil muka air untuk aliran yang melalui ujung gigi belakang gergaji dengan y/h_j yang telah terinterpolasi ditunjukkan dalam Tabel 2. Profil muka airnya ditampilkan dalam Gambar 11.

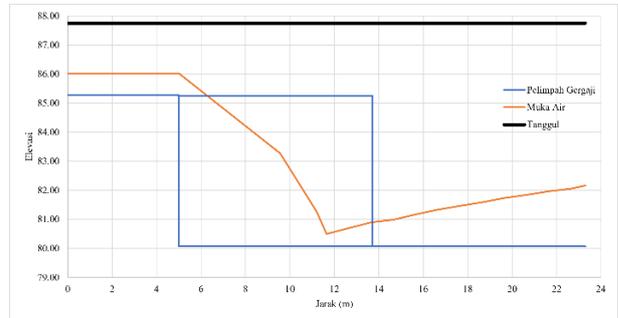
Muka air tertinggi yang terbentuk di ujung lantai transisi adalah 1,66 m pada elevasi 82,16. Kedalaman muka air ini tergolong tinggi sehingga profil muka air selanjutnya tidak akan terjun ke kolam olak melainkan akan mendapat tumbukan dari loncatan hidraulik sehingga tinggi muka air tersebut seakan-akan menerus ke loncatan hidraulik di hilir.

Hasil pengeplotan untuk profil aliran yang melalui gigi depan pelimpah gergaji ditunjukkan dalam Gambar 12. Dengan cara yang sama, perhitungan profil muka air untuk

Tabel 2.

Perhitungan Profil Muka Air yang Melalui Ujung Gigi Belakang

x	x/h_j	y/h_j	y
0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,27	0,09	0,20
2,00	0,54	0,19	0,40
3,00	0,80	0,23	0,49
4,00	1,07	0,31	0,67
5,00	1,34	0,39	0,83
6,00	1,61	0,45	0,96
7,00	1,87	0,51	1,09
8,00	2,14	0,57	1,23
9,00	2,41	0,62	1,34
10,00	2,68	0,68	1,47
11,00	2,94	0,72	1,56
11,65	3,12	0,77	1,66



Gambar 11. Profil muka air melalui ujung gigi belakang gergaji.

aliran melalui ujung gigi depan ditampilkan dalam Tabel 3.

Profil muka airnya ditampilkan dalam Gambar 13. Muka air tertinggi yang terbentuk di ujung lantai transisi adalah 0,67 m pada elevasi 81,17. Kedalaman muka air ini tergolong kecil sehingga profil muka air akan mengalir ke arah kolam olak mengikuti geometri bendung (terjunan 2).

E. Loncatan Hidraulik di Terjunan 2 menuju Kolam Olak

Profil permukaan air di terjunan 2 dihitung dengan input muka air dari ujung lantai, yaitu $y = 0,67 \text{ m}$ (dilihat dari Tabel 3). Perhitungan profil muka air di terjunan 2 disajikan dalam Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4, parameter hidrauliknya adalah:

- Kedalaman jatuh $y_1 = 0,65 \text{ m}$
 - Kecepatan aliran $V = 12,49 \text{ m/detik}$
 - Bilangan Froude $Fr = 4,96$
 - Kondisi aliran = Superkritis
 - Jenis loncatan = Loncatan tunak
 - Kedalaman lanjutan $y_2 = 4,22 \text{ m}$
 - Kedalaman air bawah y_2'
- $$y_2' = \left(1.1 - \frac{Fr^2}{120}\right) y_2 = \left(1.1 - \frac{4.96^2}{120}\right) 4.22 = 3.78 \text{ m}$$

Kedalaman air bawah lebih kecil daripada kedalaman lanjutan ($y_2' < y_2$). Maka perlu desain rip rap untuk mengurangi erosi.

F. Perencanaan Kolam Olak

Tipe kolam olak yang sesuai untuk $Fr = 4,96$ adalah Kolam Olak USBR Tipe III. Perencanaan kolam olak dihitung seperti berikut.

- Tinggi blok muka $y_u = y_1 = 0,65 \text{ m}$
- Jarak tepi ke blok muka $0,5y_u = 0,32 \text{ m}$
- Tinggi blok halang $n_3 = 0,97 \text{ m} \approx 1,00 \text{ m}$
- Lebar atas blok halang $0,2n_3 = 0,20 \text{ m}$
- Jarak tepi ke blok halang $0,675n_3 = 0,68 \text{ m}$

Tabel 3.

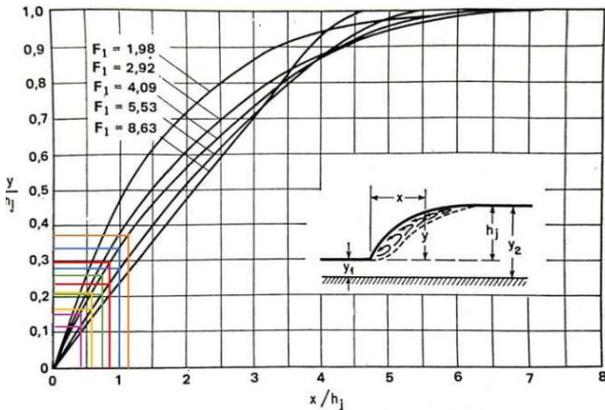
Perhitungan Profil Muka Air yang Melalui Ujung Gigi Depan

x	x/h _j	y/h _j	y
0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,14	0,05	0,12
1,00	0,28	0,10	0,22
1,50	0,42	0,12	0,25
2,00	0,56	0,17	0,37
2,50	0,70	0,21	0,45
3,00	0,84	0,26	0,55
3,50	0,98	0,29	0,62
3,78	1,06	0,31	0,67

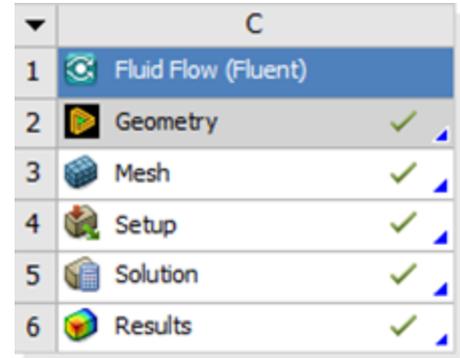
Tabel 4.

Perhitungan Profil Permukaan Air di Terjunan 2 Pelimpah Gergaji

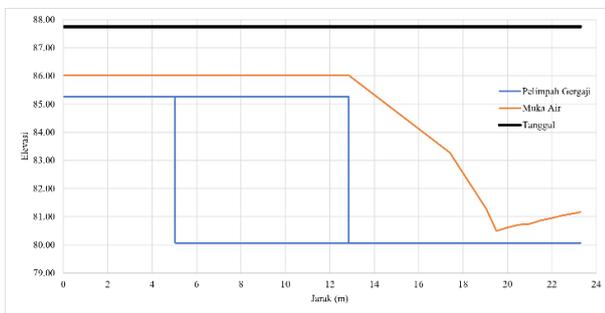
Z	H _z	V _z	Fr	Elev. Dasar	Elev. Muka Air	Cek V
5,20	0,67	10,10	3,95	80,07	80,74	-
5,25	0,80	10,02	3,58	80,02	80,82	0,001
5,36	0,79	10,14	3,64	79,91	80,70	0,001
5,53	0,78	10,31	3,73	79,74	80,52	0,001
5,77	0,76	10,55	3,86	79,50	80,26	0,001
6,09	0,74	10,87	4,03	79,18	79,92	0,000
6,51	0,72	11,26	4,25	78,76	79,48	0,000
7,08	0,69	11,77	4,54	78,19	78,88	0,000
7,93	0,65	12,49	4,96	77,34	77,99	0,000



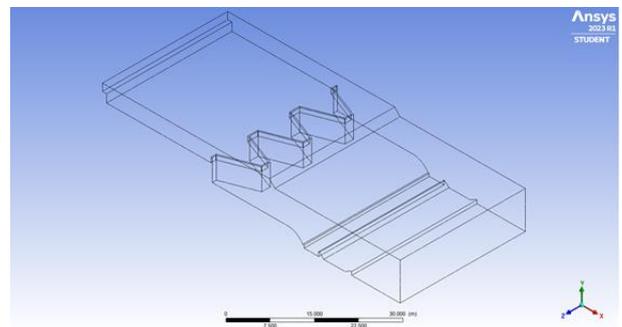
Gambar 12. Hasil pengeplotan untuk profil aliran yang melalui gigi depan pelimpah gergaji.



Gambar 14. Tahap pemodelan dengan ANSYS-Fluent.



Gambar 13. Profil muka air melalui ujung gigi depan gergaji.



Gambar 15. Hasil penggambaran geometri bendung gergaji.

Jarak antar blok halang $0,75n_3 = 0,75 \text{ m}$
 Tinggi ambang ujung $n = 0,83 \text{ m} \approx 0,80 \text{ m}$
 Jarak blok muka-blok halang $0,82y_2 = 3,46 \text{ m} \approx 3,50 \text{ m}$
 Panjang total kolam olak $2,7y_2 = 11,41 \text{ m} \approx 11,40 \text{ m}$
 Dimensi kolam olak hasil perhitungan mendekati dimensi eksisting, maka tidak memerlukan kolam olak baru.

G. Analisis Hidraulika Aliran di Kolam Olak

Kedalaman air yang terbentuk di hilir kolam olak adalah y'_2 , yaitu 3,78 m. Kedalaman air yang besar berpotensi menyebabkan penggerusan pada lantai. Untuk mengetahui kedalaman penggerusannya dilakukan perhitungan dengan Metode Veronese.

Tinggi muka air $H = y'_2 = 3,78 \text{ m}$
 Debit $Q_{50} = 245,94 \text{ m}^3/\text{detik}$
 Lebar kolam olak $B = 30 \text{ m}$
 Debit per satuan panjang $q = 8,20 \text{ m}^3/\text{s/m}$

$$ds = 1,90 \times H^{0,225} \times q^{0,54}$$

$$= 1,90 \times 3,78^{0,225} \times 8,2^{0,54} = 7,98 \text{ m}$$

$$ds = 7,98 - 3,78 = 4,20 \text{ m}$$

Kedalaman penggerusan 4,20 m tergolong besar. Selain itu, pola loncatan hidraulik yang terhitung dari Subbab IV.E adalah $y'_2 < y_2$ yang mana berpotensi menyebabkan erosi. Maka perlu dipasang rip-rap untuk mengurangi bahaya erosi.

Perhitungan D_{50} dan ketebalan (t) rip rap sebagai berikut.

$$V = \frac{Q}{B \times y'_2} = \frac{245,94}{30 \times 3,78} = 2,17 \text{ m/detik}$$

$C = 0,86$ (0,86 turbulensi tinggi, 1,2 turbulensi rendah)
 $S = 2,5$ (berkisar 2,5 sampai 3)

$$D_{50} = \frac{V^2}{2g \times C^2 \times (S - 1)} = \frac{2,17^2}{2 \times 9,81 \times 0,86^2 \times (2,5 - 1)}$$

$$= 0,22 \text{ m} = 22 \text{ cm} \approx 25 \text{ cm}$$

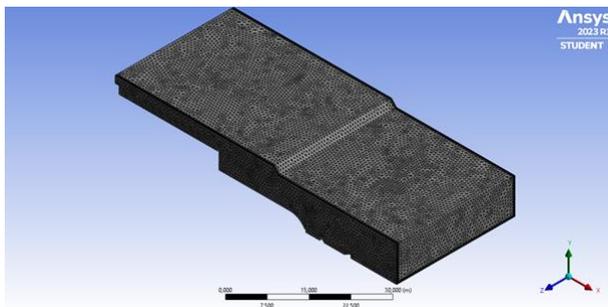
$$t = (1,5D_{50}) + (50\% \times D_{50}) = 3,75 + 12,5$$

$$= 50 \text{ cm} \times 2 = 100 \text{ cm}$$

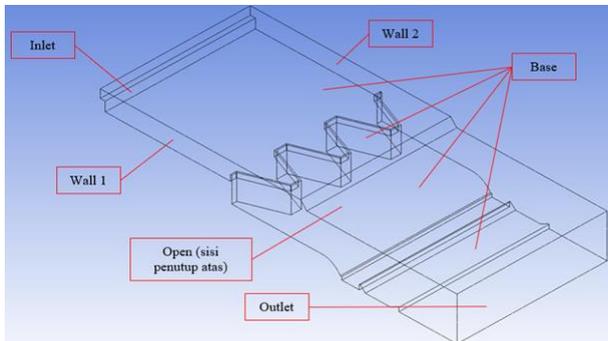
H. Pemodelan Aliran dengan ANSYS-Fluent

Pemodelan aliran melalui bendung dengan ANSYS-Fluent dilakukan dengan tahapan seperti dalam Gambar 14. Tahap pertama adalah penggambaran geometri bendung dalam Menu *Geometry*. Hasil penggambarannya ditunjukkan dalam Gambar 15. Selanjutnya masuk ke Menu *Mesh* untuk melakukan *meshing* dengan metode tetrahedral seperti Gambar 16. Masih dalam Menu *Mesh*, dilakukan juga penamaan setiap domain seperti dalam Gambar 17.

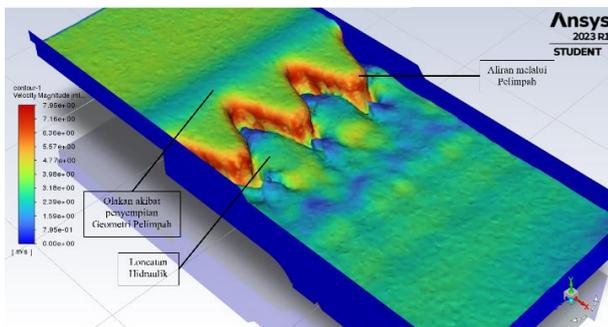
Tahap selanjutnya adalah *setup* yang mana sangat penting untuk mengatur hasil simulasi yang tepat. *Setup* diatur sebagaimana dalam Tabel 5. Setelah *setup* dilakukan, maka dapat dilakukan *running calculation* dengan *number of steps* minimal 200. Dalam simulasi ini dilakukan sampai 1250



Gambar 16. Hasil meshing.



Gambar 17. Penamaan setiap domain bangunan bendung.



Gambar 18. Tangkapan gambar hasil video simulasi.

steps agar keseluruhan model aliran dapat tersimulasikan secara utuh dari hulu sampai dengan hilir.

Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk video animasi dan gambar. Tangkapan gambar dari video animasi hasil simulasi ditampilkan dalam Gambar 18. Video hasil simulasi menggambarkan aliran yang melalui pelimpah gergaji berupa olakan yang terjadi akibat perubahan lebar pelimpah (penyempitan gigi gergaji), terjunan air melalui pelimpah gergaji, dan loncatan hidraulik di lantai transisi maupun kolam olak.

Sedangkan hasil simulasi dalam bentuk gambar ditampilkan dalam bentuk kontur. Kontur ini dapat dilihat dari berbagai view. Dalam penelitian ini dilihat dari Plane 1, yaitu potongan memanjang yang melalui gigi belakang gergaji; dan Plane 2 yaitu potongan memanjang yang melalui gigi depan gergaji. Kontur yang digambarkan digunakan untuk melihat *water volume fraction* (WVF) dan *eddy viscosity*. WVF merupakan parameter yang menunjukkan persentase volume (vol%) untuk suatu komposisi, termasuk fluida. $WVF = 1$ menggambarkan komposisi air 100%, sedangkan $WVF = 0$ menggambarkan komposisi udara 100%. Sedangkan *eddy viscosity* merupakan parameterisasi untuk fluks momentum eddy (tegangan Reynolds) yang akan bekerja cukup baik ketika pusaran yang terjadi dalam aliran kecil, dan tidak baik ketika pusaran aliran yang terjadi besar. Kontur hasil simulasi dijelaskan sebagai berikut.

Tabel 5.

Setup untuk pemodelan numerik dengan ANSYS-Fluent	
Menu	Pengaturan
General	Transient, Gravity ($y = -9.81 \text{ m/s}^2$)
Models	Volume of Fluid, Implicit, Implicit Body Force, Open Channel Flow
Phases	Primary phase: air, Secondary phase: water
Phase interaction	Constant (0,072 N/m), Surface Tension Force Modeling
Viscous Model	k-epsilon, Standard, Standard Wall Function
Boundary Condition	
• Inlet	Momentum: Normal to Boundary
Phase: mixture	Multiphase: Open Channel, Free Surface Level and Velocity
Type: pressure inlet	
• Outlet	Momentum: From Neighboring Cell
Phase: mixture	Multiphase: Open Channel, From Neighboring Cell
Type: pressure outlet	
• Base	Momentum: Stationary wall, no slip, standard
Phase: mixture	
Type: wall	
• Wall	Momentum: Stationary wall, no slip, standard
Phase: mixture	
Type: wall	
• Open	Momentum:
Phase: mixture	Backflow direction spesification method = From Neighboring Cell
Type: pressure outlet	
Solution Method	Scheme: Coupled
Solution Initialization	Initialization method: Standard initialization
	Compute from: inlet
	Open channel Initialization: flat

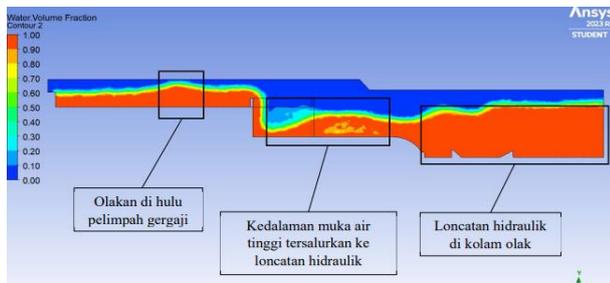
Gambar 19 menunjukkan kontur WVF untuk Plane 1, dimana terjunan aliran yang melalui gigi belakang pelimpah gergaji tidak membentuk loncatan hidraulik namun muka air di ujung lantai transisi tinggi. Profil muka air tersebut seakan-akan tersalurkan ke kolam olak di mana loncatan hidraulik kolam olak juga terbentuk.

Sedangkan Gambar 20 menunjukkan kontur WVF untuk Plane 2, dimana aliran yang masuk ke pelimpah gergaji mengalami olakan akibat penyempitan penampang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tinggi olakan air masih di bawah tanggul sehingga elevasi tanggul eksisting aman.

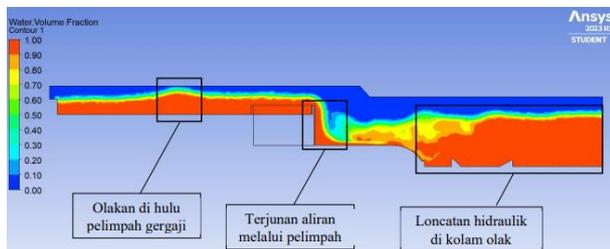
Gambar 21 dan Gambar 22 menunjukkan hasil simulasi untuk parameter *Eddy Viscosity*. Gambar 21 menunjukkan *Eddy Viscosity* yang besar baik di lantai transisi maupun di kolam olak. Hal ini menunjukkan bahwa turbulensi yang terjadi di lantai transisi dan kolam olak besar. Sedangkan Gambar 22 menunjukkan bahwa turbulensi yang terjadi di lantai transisi kecil karena *Eddy Viscosity* berkisar 20–40 Pa s. Sedangkan turbulensi di kolam olak besar. Turbulensi yang besar di kolam ini dapat berpengaruh terhadap keamanan lantai dasar yang disebabkan oleh energi dari turbulensi besar. Dengan demikian, tepat jika desain ini direncanakan memasang rip-rap untuk mengatasi turbulensi besar ini. Dengan kesesuaian hasil simulasi dengan perhitungan manual, maka desain pelimpah gergaji dapat ditetapkan seperti pada Gambar 23.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

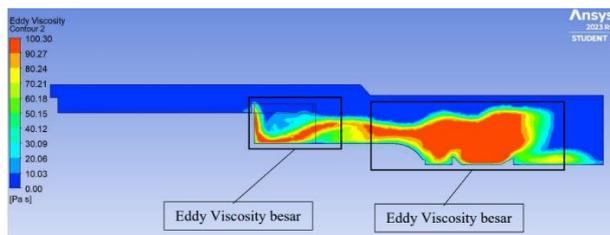
Desain pelimpah gergaji direncanakan dengan $P = 1,20 \text{ m}$ dan $H = 0,75 \text{ m}$. Konstruksi pelimpah gergaji dibangun dengan membongkar terjunan 1 eksisting namun mempertahankan lantai transisi dan terjunan 2. Aliran yang jatuh melalui pelimpah gergaji terjun pada jarak 6,65 m dengan $Fr = 5,34$. Profil muka air yang melalui ujung gigi



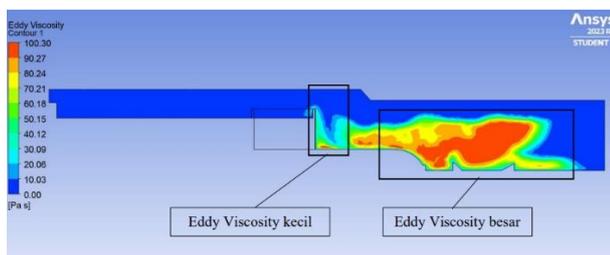
Gambar 19. Kontur WVF untuk plane 1.



Gambar 20. Kontur WVF untuk plane 2.



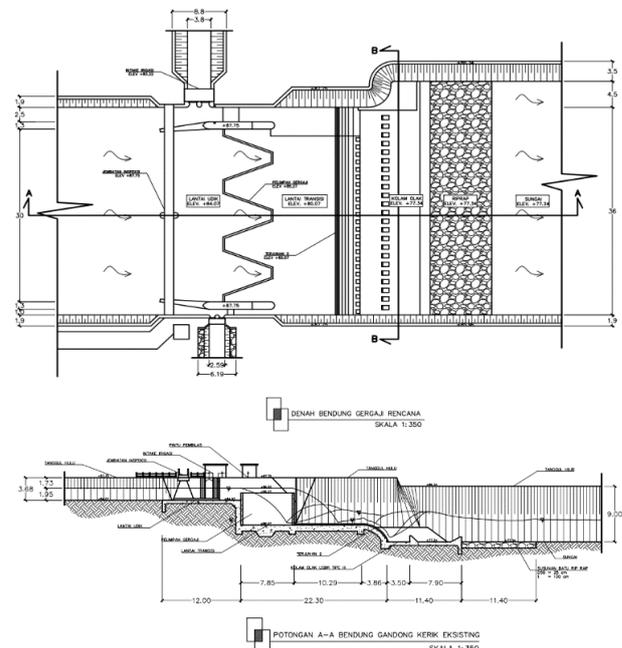
Gambar 21. Kontur eddy viscosity untuk plane 1.



Gambar 22. Kontur eddy viscosity untuk plane 2.

depan pelimpah gergaji membentuk muka air yang tinggi di ujung lantai transisi sehingga muka air lanjutannya seakan-akan menerus ke loncatan hidraulik di hilir. Sedangkan profil muka air yang melalui ujung gigi belakang membentuk muka air yang kecil sehingga profil muka air lanjutannya mengalir ke arah kolam olak mengikuti geometri bendung (terjunan 2). Profil muka air di ujung terjunan 2 membentuk $Fr = 4,96$, $V = 12,49$ m/detik, $y_2 = 4,22$ m, $y'_2 = 3,78$ m. Pola loncatan hilir adalah $y'_2 < y_2$ dan kedalaman gerusan 4 m berpotensi menyebabkan erosi sehingga dipasang rip-rap dengan diameter 25 cm dan ketebalan 100 cm untuk mengurangi erosi.

Video animasi dari ANSYS-Fluent menggambarkan olakan akibat perubahan lebar pelimpah (penyempitan), terjunan melalui pelimpah gergaji, serta loncatan hidraulik di kolam olak. Kontur *water volume fraction* mengonfirmasi hasil analisis profil muka air yang melalui gigi depan dan belakang pelimpah gergaji dari perhitungan manual. Kontur *Eddy Viscosity* menunjukkan bahwa turbulensi tinggi terjadi pada loncatan hidraulik yang mana dapat mencapai 100 Pas.



Gambar 23. Desain final bendung gergaji di Bendung Gandong Kerik.

Perhitungan manual maupun simulasi dengan ANSYS-Fluent menunjukkan tidak adanya aliran yang meluap melebihi tanggul eksisting.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Bengawan Solo Tahun 2010," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2010.
- [2] A. K. Idrees dan R. Al-Ameri, "Investigation of flow characteristics and energy dissipation over new shape of the trapezoidal labyrinth weirs," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 89, hal. 102276, 2023, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2022.102276.
- [3] M. C. Aydin dan M. E. Emiroglu, "Numerical analysis of subcritical flow over two-cycle trapezoidal labyrinth side weir," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 48, hal. 20–28, 2016, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.01.007.
- [4] H. Zahedi Khameneh, S. R. Khodashenas, dan K. Esmaili, "The effect of increasing the number of cycles on the performance of labyrinth side weir," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 39, hal. 35–45, 2014, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.05.002.
- [5] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "Keputusan Menteri Perumahan dan Prasarana Wilayah Nomor 360/KPTS/M/2004 tentang Perencanaan hidraulik bendung dan pelimpah bendungan tipe gergaji," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2004.
- [6] K. G. R. Raju, *Aliran Melalui Saluran Terbuka*. Jakarta: Erlangga, 1986.
- [7] V. Te Chow, *Hidrolika Saluran Terbuka (Open Channel Hydraulics)*. Jakarta: Erlangga, 1984.
- [8] United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, "Research Studies on Stilling Basins, Energy Dissipators and Associated Appurtenances," United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1960.
- [9] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "Standar Perencanaan Irigasi KP-02 Bagian Bangunan Utama," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2010.
- [10] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "Standar Perencanaan Irigasi KP-04 Bagian Bangunan," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2013.
- [11] B. A. Bakhmeteff dan A. E. Matzke, "The hydraulic jump in terms of dynamic similarity," *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 101, no. 1, hal. 630–647, 1936, doi: 10.1061/taceat.0004708.